第1章

2.4GHz帯無線端末の電波干渉回避術，教えます

ZigBeeに対するワイヤレスLAN干渉信号の対策を実証

荒井康之，松尾浩一

今日，電波を利用したワイヤレス通信は，現代社会に欠かせない通信手段の一つとなりつつあります．ところで，電波は（周波数帯域が）有限の公共財産であり，その利用は法律によって規制されていますが，多くの人が使用できる簡易で実用的なワイヤレス通信手段を提供するため，免許が不要な周波数帯「ISM（Industrial,Scientific and Medical）バンド」が規定されています．ISMバンドは各国で共通した仕様の取り決めが進められており，かつ用途範囲も広いため，この周波数帯を利用したワイヤレス通信機器はこれからも増加していくものと思われます．ISMバンドの中では，現在，とくに2.4GHz帯の利用が進んでいます．2.4GHz帯ではさまざまな通信方式が乱立しており，それぞれの通信が互いに干渉を与える危険性が増してきています．ここではワイヤレス通信の普及による問題点をまとめながら，2.4GHz帯を利用する機器において安定した通信を実現するための電波干渉対策を紹介します．また，実際にワイヤレスLANとZigBeeの干渉試験を行い，対策の妥当性を評価しました．（筆者）

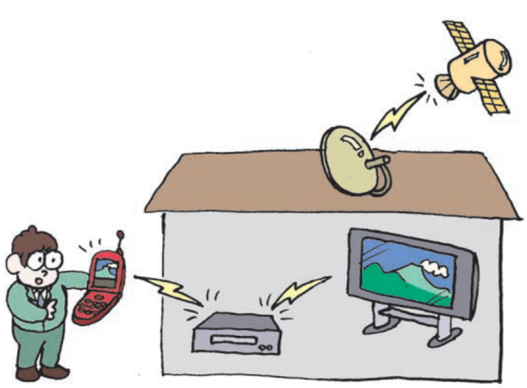


図1　さまざまな分野に利用されるワイヤレス通信

ワイヤレス通信は，軍事から商用まで幅広く使用されている．また，ワイヤレス通信を用いて送受信されるデータの種類も目的もさまざまで，制御コマンドのような情報量の少ないものから，音声，映像などのリアルタイム応答を必要とする信号まで，ワイヤレスである利点を生かした数多くの応用がなされている．

17世紀にマクスウェル（英国の物理学者）が電磁波の存在を予測した後，1895年にはイタリアのマルコーニが無線電信機で大西洋を横断した交信に成功しました．それから100余年，ワイヤレス通信は近年，情報の高度化とともに急速な発展を遂げてきました．

ワイヤレス通信はその名のとおり，通信路にワイヤ（有線）を必要としない通信手段です．電波を用いて離れた位置にある通信機器間の通信を行うことで，例えば衛星探査機のように宇宙空間で数千万kmを越える機器の制御や，テレビ放送のように何百万世帯への映像の同時配信など，軍事から商用まで幅広く使用されています（**図1**）．また，電話のような有線通信手段も離島や山岳部などでは一部無線通信を利用しており，ワイヤレス通信は日常生活に欠かすことのできないインフラの一つとなっています．

● 機器間のデータの利用を容易にする無線通信

わたしたちが日常使用するワイヤレス通信機器としては，テレビやラジオなどの情報機器，携帯電話に代表されるコミュニケーション機器，IrDAやワイヤレスLANを搭載したデータ通信機器などが挙げられます．

国内のテレビの世帯普及率はほぼ100%に達しており，もっとも身近な電波を利用する機器と言えます．今後のテレビ放送はディジタル化によるチャネル数の増加や文字放送などのサービスが向上し，受け取った音声や映像，文字情報などをほかの機器でも利用するという要求が増えていくことでしょう．一方，FPD（flat panel display；薄型ディスプレイ）などでは映像表示機器としてテレビ・チューナからの出力だけでなく，DVD/HDDプレーヤやディジタル・ビデオ・カメラなどの信号を表示することが求められるため，利便性の面からワイヤレス通信を用いた情報伝達

の導入が検討されています．

携帯電話などのコミュニケーション手段については，国内ではすでに端末の増加傾向が鈍化してきています．その一方で，カメラ機能やインターネット閲覧機能，テレビやラジオの視聴機能などの搭載によって携帯電話のマルチメディア化が進んでいます．携帯電話に集まる情報量は日々増加しており，ハード・ディスク装置の搭載も近いと予想されています．個人が大量のデータを持ち歩き，携帯電話がデータ・ゲートウェイとして機能するとき，そのデータを外部の装置に入出力するためのインターフェースとして高速ワイヤレス通信が有望視されています．携帯電話にはIrDAが搭載され，一部にはワイヤレスLANやBluetoothなどの導入も試みられています．今後，さらに高速なワイヤレス通信規格を持つ携帯電話も登場してくるでしょう．

通信には「ネットワーク外部性」と呼ばれる原理が働きます．すなわち，ネットワークは利用する参加者が増えることで利便性が飛躍的に向上し，そのネットワークを保有することそのものが参加者の価値を高めて利用者をさらに増加させます．ワイヤレスLANやBluetoothは，この10年間で普及し始めた新しい近距離無線データ通信であり，標準規格がもたらすネットワーク外部性に後押しされて，今後，さらに利用者が増加していくと考えられています（**図2**）．また，データ通信機器の性能改善では，これらの技術を補完し，データ伝送速度を向上したり，低消費電力動作を追求する技術検討も活発に行われています．例えば，高速化については100Mbpsを超えるワイヤレスLANの規格であるIEEE 802.11nの標準化や，UWB（ultra wideband）と呼ばれる500Mbps以上の通信が可能になる技術の検討が行われています．一方，低消費電力で無線センサ・ネットワークの構築が可能なZigBeeなどの通信方式も策定されています．

1 周波数不足や干渉などの問題

ワイヤレス通信では，低いものでは数十kHz，高いものなら数十GHzの電波を使用します（**図3**）．電波の波長は，以下の式で表されます．

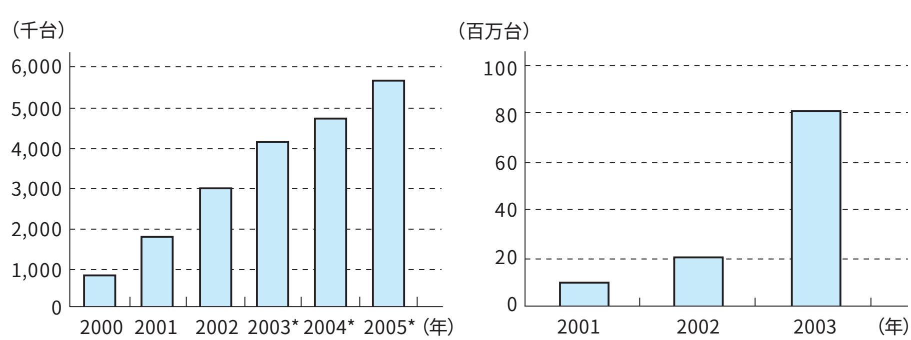
波長［m］＝300÷周波数［MHz］

周波数の低い（波長が長い）電波は，回折しやすい，浸透性が高いといった特徴があり，一般に建物の影や内部でも電波が到達しやすく，長距離の通信に向いています．例えば，電波時計は40kHzと60kHzの長波（LF：low frequency）の電波，ラジオは1000kHz近傍の中波（MF：medium frequency）の電波を使用しており，屋内でも受信できる範囲が広くなります．

一方，周波数が高く（波長が短く）なるほど，電磁波として高いエネルギーを持つ，直線性が強いなどの特徴を持ち，一般には到達しにくくなります．100MHz近傍の電波を利用するテレビ放送（VHF：very high frequency）を受信するには屋外のアンテナが必要になります．また，12GHz近傍の電波を利用する衛星放送（SHF：super high frequency）では，衛星の見える位置にアンテナの方向を合わせて設置しなければなりません．

また，無線変調方式には振幅変調（AM：amplitude modulation）や周波数変調（FM：frequency modulation），位相変調（PM：phase modulation）などのアナログ変調技術と，振幅偏移変調（ASK：amplitude shift keying）や周波数偏移変調（FSK：frequency shift keying），位相偏移変調（PSK：phase shift keying）などのディジタル変調技術があります．一般に，変調を行った信号は次の式で表されます．

1



(a) ワイヤレスLANの出荷数
(b) Bluetoothの出荷数

図2
ワイヤレスLANとBluetoothの出荷数
ここ数年でワイヤレスLANやBluetoothの出荷数が増加しており，今後も増え続けると予想されている．＊は予測値．

著作権者：（株）矢野経済研究所
出典元：2003年版　ワイヤレスネットワークシステム市場の将来展望

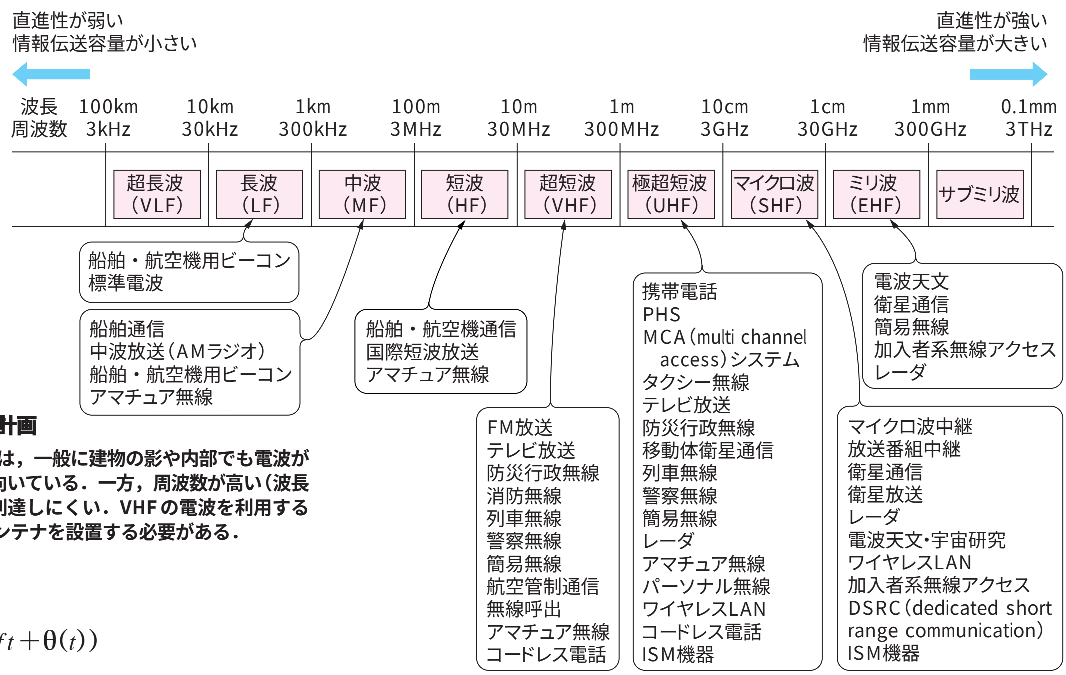


図3
総務省による周波数割り当て計画
周波数が低い（波長が長い）電波は，一般に建物の影や内部でも電波が到達しやすく，長距離の通信に向いている．一方，周波数が高い（波長が短い）電波は，一般に電波が到達しにくい．VHFの電波を利用するテレビ放送などでは，屋外にアンテナを設置する必要がある．

$$S(t)=A(t)\cos(2\pi ft+\theta(t))$$

$A(t)$は振幅にかかわる項を，$\theta(t)$は周波数または位相にかかわる項を表します．搬送波（$2\pi ft$）に信号を変調すると，信号の変調速度によって占有する周波数幅が異なってきます．すなわち，伝送速度が速くなるほど広い占有周波数帯域を要することになります．データ通信に使用されるのは，比較的高い周波数（数GHz）の電波が多いといえます．理由は，伝送速度を向上させるためには広い占有周波数帯域が必要であり，周波数を高くするほど広い帯域の周波数の割り当てが容易になるためです．周波数を高くすると波長が短くなるためアンテナを小型にでき，機器への組み込みが容易になるという利点があります．ただし，通信距離が短くなることや開発技術の制約によって商品化が難しくなるなど，克服しなければならない技術課題もたくさんあります．

● 周波数不足を解決するための利用効率向上対策

ワイヤレス通信の需要が増加し続ける昨今，有限な資源である電波（周波数帯）の不足が深刻な問題になってきています．とくに携帯電話など，個人向けの通信機器の普及や大容量のデータ通信が必要とされる中，周波数の合理的な割り当てと効率の良い電波の使用が求められています．多くの人々が電波を利用でき，かつ高度化する情報システムにおいて高速なデータ通信を行うため，通信容量の増加は重要な課題です．周波数の利用効率を上げて，通信容量を増やす方法として，以下の三つの技術が挙げられます．

1）変調方式の変更

アナログ変調方式からディジタル変調方式に変更したり，直交変調技術や符号分割多重技術などを用いて周波数の利用効率を高めることで，占有周波数帯域幅に対する通信容量を増やすことが可能になります．

2）小セル化による周波数の再利用

ワイヤレス通信を広い地域に提供するため，セル技術が用いられています．ここで，セルとは「一つの基地局で電波の届く範囲」のことです．適当な距離をおいて複数の基地局を配置することで，ある地域内ではどこでもワイヤレス通信が可能となります．セルが重ならなければ同じ周波数を再利用できるので，通信可能範囲を狭く（小セル化）することで，ほかの通信との電波干渉を避けつつ，通信容量を増やすことができます．

3）周波数共用技術の利用

「ほかのワイヤレス通信システムが使用していない電波（周波数帯）を独占して使うことで，ほかからの干渉を受けずに安定した通信を行う」というのが従来の考えかたでした．そのため，電波使用に関する免許制度を設け，周波数の独占を認可することで各ワイヤレス通信を保障してきました．

しかし近年，米国で認可されたUWBという無線技術は，ほかに既存のワイヤレス通信システムが存在しても運用上

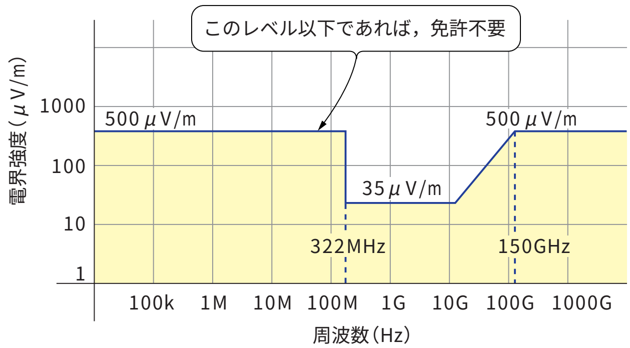


図4　微弱無線局の許容電界強度
図は，総務省が定めた微弱無線局の3mの距離における電界強度の許容値．

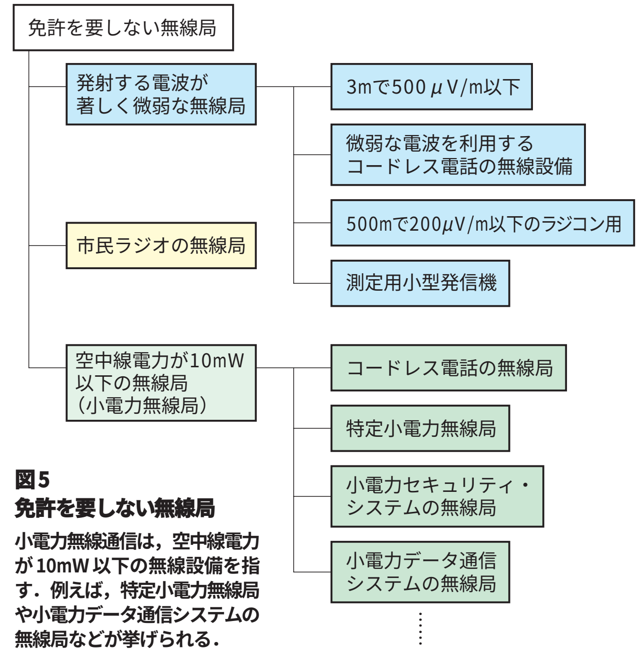


図5
免許を要しない無線局
小電力無線通信は，空中線電力が10mW以下の無線設備を指す．例えば，特定小電力無線局や小電力データ通信システムの無線局などが挙げられる．

問題となる干渉を与えずに通信を共存させることができます．電子機器のノイズ（雑音）と同じレベルまで送信出力を下げて広い周波数に情報を拡散し，ノイズ特性に類似した電波を通信に使用することで，周波数の共用を実現しています．UWBの通信は既存の雑音とみなせるため，電波干渉が発生していると認識できないのです．この技術によって新たな周波数の利用が可能となり，超高速通信の実現が期待されています．

● 混雑する免許不要のISMバンド

ワイヤレス通信を行うためには，一般に無線局の免許が必要となります．身近な携帯電話でも無線局の免許は必要であり，この場合は通信事業者が免許を取得して電波を使用しています．

一方，電波法では免許を必要としない無線局も認めています．ほかの通信に影響を与える可能性の非常に少ない送信出力の電波を利用した無線通信設備に適応できる「微弱無線通信」や「小電力無線通信」などがこれに該当します．

微弱無線通信はその名のとおり，無線設備からの距離が3mで500μV/m（322MHz以下の場合）という微弱な電波を用いるものです（**図4**）．電波が弱いため通信範囲は狭く，10m程度です．また，無線遠隔操縦を行うラジコンやワイヤレス・マイク用に別の規定によって定められた周波数を用いて，距離500mで電界強度200μV/m以下という無線設備もあり，これも利用にあたっては免許が不要です．

小電力無線通信は，空中線電力が10mW以下の無線設備を指し，「特定小電力無線局」や「小電力データ通信システムの無線局」などがあります（**図5**）．これはある程度の強さの電波を認めてワイヤレス通信の利用範囲を広げていますが，使用できる周波数が決められており，「技術基準適合証明」を受けなければなりません．この証明は，TELEC（テレコムエンジニアリングセンター）が総務大臣から指定を受け，無線設備の技術基準に沿って試験を行い，適合証明業務を実施しています．

ISMバンドも免許不要で使用できる周波数帯です．ISMバンドとしては，13.56MHz，27.12MHz，40.68MHz，900MHz帯，2.4GHz帯，5.7GHz帯などが割り当てられています．この中でも，とくに各国共通で利用できて比較的高速な伝送を行える2.4GHz帯（2.400GHz～2.4835GHz）が，データ通信をはじめとする無線情報ネットワークに幅広く利用されています．2.4GHz帯のISMバンドは，以下に示すような通信をはじめ，電子レンジやRFIDなど，さまざまな用途に用いられるため，今後，通信量が大幅に増加すると予想されています．

- **IEEE 802.11b**：変調方式として直接拡散方式（DSSS：direct sequence spread spectrum）を用いて11Mbpsの伝送速度を実現する
- **IEEE 802.11g**：直交周波数分割多重方式（OFDM：orthogonal frequency division multiplexing）を用いて54Mbpsの伝送速度を実現する
- **Bluetooth**：1秒間に1,600回，周波数を変更する周波数ホッピング方式を用いて1Mbpsの伝送速度を実現する
- **ZigBee**：直接拡散方式を用いて250kbpsの伝送速度を

実現する
なお，この2.4GHz帯は，通信の目的や種類を限定しておらず，電波干渉が発生することを前提として開放されています．

● 電波干渉，二つの発生メカニズム

無線通信機器が発生する電波による干渉には，帯域外干渉と帯域内干渉の二つがあります．

まず帯域外干渉ですが，これは通信機器が電波を発信する際，通信を行う占有周波数帯域（使用が認められている周波数）以外の周波数に不要な電波を放射することです．ほかの重要なワイヤレス通信システムに有害な干渉を与える可能性があるため，厳しい規制が課せられています．帯域外干渉の場合，搬送波を生成した際の2倍，3倍の高調波（スプリアス）やRF（高周波）回路の非線形性から生じるひずみ信号の高調波成分が問題となります．帯域外の信号成分を抑制するため，ローパス・フィルタなどの高周波フィルタを挿入して不要電波の放射を減衰させる必要があります．

帯域内干渉は，同じ周波数帯で通信を行う際，新たな通信が既存の通信に干渉を与えることを指します．ある周波数で行われている通信と同じ周波数，もしくは近傍の周波数で通信を行うと，受信システムに電波干渉として影響を与えます．お互いの通信に影響を与えないようにするためには，通信システムの制御によって干渉を回避することが必要になります．しかし，ISMバンドでは変調方式や通信プロトコルの異なる複数の電波を利用するため，干渉回避策を通信によって確認することは容易ではありません．

2 電波干渉回避術とZigBeeによる実証

通信速度が遅い，無線通信が切断されるなどの現象が起こったとき，その原因はおもに電波干渉である可能性が高いと考えられます．設計者は干渉問題を最小限に抑えようと努力しますが，自分の行った設計とは関係なく発生する干渉もあります．

では，どのようにして干渉を防げばよいのでしょうか．

● 電波干渉を防ぐ五つの対策

電波干渉を低減する手法は，すでにさまざまな業界団体や半導体/機器メーカから提案されていますが，一般的に以下のような方法で干渉を避けているのではないでしょうか．なお，一部，具体例として今年（2005年）から来年にかけて対応製品が数多く登場すると言われているZigBee（Wireless PAN）を例に挙げています．

1）チャネル変更で電波干渉を防ぐ

あるネットワークがあるチャネルを使用しているとき，そのチャネルを使用せず，ほかのチャネルを使用して通信することで電波干渉を回避できます．

例えばZigBeeの場合，ネットワーク層，MAC（media access control）層，物理層と連係しながら空中のエネルギーを検知して空きチャネルを探し出し，そこにネットワークを自律構築する機能を備えています．

2）キャリア・センスで電波干渉を防ぐ

送信前に周囲に衝突する信号の有無を確認することで，電波干渉を回避することができます．これは，アクセス制御方式の中ではCSMA/CA（carrier sense multiple access with collision avoidance）と呼ばれる技術です．IEEE 802.11b準拠のワイヤレスLANやIEEE 802.15.4準拠のZigBeeなどがこの方式を採用しています．

3）送信電力を下げることで電波干渉を防ぐ

送信電力を下げることで，ほかのネットワーク通信に対する電波干渉を回避することができます．

例えばZigBeeの場合，ネットワークの親デバイスの役目を担うコーディネータ（coordinator；ワイヤレスLANのアクセス・ポイントに相当）のRFパワーが強ければ受信状態が良くなると考え，送信電力を最大限に使用しようと思いがちです．しかし実際には，割り当てられた領域をカバーするために最低限必要な電力量しか使用しないことで，近隣のネットワークと共存できる可能性が高くなるのです．

4）通信容量を下げて共存させる

通信バイト数を減らすことで，ほかのネットワーク通信に対する電波干渉を回避できます．

二つのネットワークが近くの帯域のチャネルを使用したとしても，通信バイト数が少なければほかのネットワークがOFFになっている間に送信し終わる可能性が高くなります．その結果，電波干渉が起こる可能性を減らすことができます．

5）アンテナのヌル点を当てる

アンテナの指向性を利用することで，電波干渉を回避することができます．

具体的には，アンテナのヌル点（電波の送受信が行われない方向）を干渉元および干渉先となる方向に向けます．物理的にアンテナの向きを変更してヌル点を合わせたり，ア

ンテナに供給する信号の位相を変えることでヌル点を移動して干渉回避の制御を行うことができます.

● ZigBeeとワイヤレスLANの干渉試験

実際に筆者らは，ZigBeeとワイヤレスLAN（この試験ではIEEE 802.11b）の干渉試験を行いました．この試験では，2.4GHz帯を用いるこれら二つの通信方式において，

- **チャネル変更で電波干渉を防ぐことができる**

もしくは，

- **送信電力を下げることで電波干渉を防ぐことができる**

という点を観察しました.

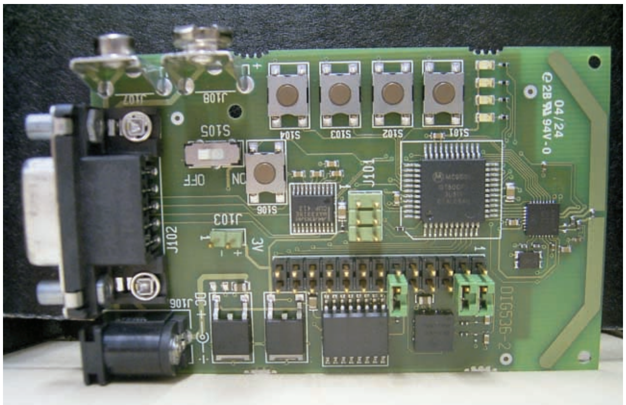
試験手順を簡単に説明しておきます．ZigBeeとワイヤレスLANの干渉試験のシステム構成を**図6**に示します．

二つの信号発生器は，ZigBee送信信号用とワイヤレスLAN干渉信号用として使用しました．ZigBee用の信号発生器は送信データがあらかじめ格納されており，ZigBee対応のトランシーバIC（米国Freescale Semiconductor社のMC13192）の受信準備ができたときにRF信号を出力する仕様としました.

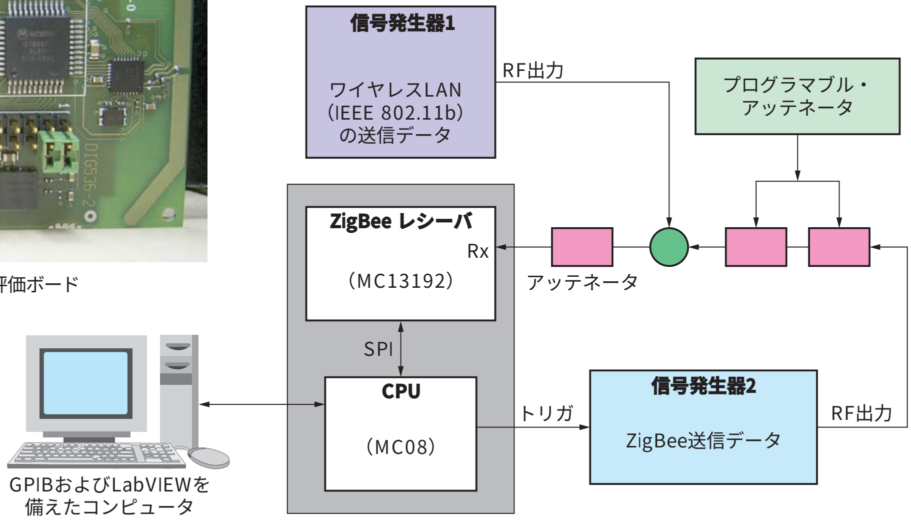
ワイヤレスLAN用の信号発生器には，ワイヤレスLAN干渉信号としての送信データがあらかじめ格納されています．この信号発信器は，ZigBeeレシーバが信号を受信するときにRF信号を出力する仕様としました．そのほかのテスト仕様は**表1**に示すとおりです.

ワイヤレスLAN干渉信号は，周波数とパワー（送信電力）からなります．上述したように，今回の試験では「送信電力を下げることで電波干渉を防げる」ということを確認することが目的の一つです．そこで，ZigBee対応トランシーバIC（MC13192）を搭載したレシーバ装置においてパケット受信の成功が確認されるまで，ワイヤレスLAN干渉信号の送信電力を下げていきます.

なお，今回はパケット受信の成功を，「1,000パケットを送信し，エラー・パケットが4パケット以下」と定義しました．パケット送受信のパケット・エラー率については，測定制御通信はケーブルを介して（有線で）行いました．ま



（**a**）試験に使用したZigBee対応評価ボード



（**b**）システム構成

図6
干渉試験のシステム構成
ZigBee用とワイヤレスLAN用に二つの信号発生器を用意した．それぞれの信号は同軸ケーブルを介して出力される．

表1
テスト仕様

	ZigBee	ワイヤレスLAN（IEEE 802.11b）
パケット数	29バイト	ZigBeeパケット受信時には，かならず干渉信号として衝突するようにプログラムした
使用周波数（MHz）	2405，2430，2455，2480	2412，2417，2422，2427，2432，2437，2442，2447，2452，2457，2462，2467，2472，2477，2482
受信感度	－82dBm	各チャネルにおいて，－10dBmから開始し，信号発生器を用いて可変制御する
占有周波数帯域幅（MHz）	2	22（北米の場合）

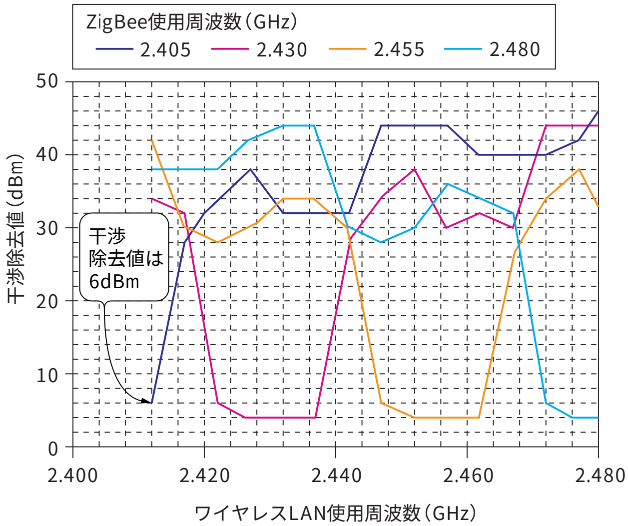


図7　ZigBeeに対するワイヤレスLAN干渉除去

縦軸は干渉除去値，横軸はワイヤレスLANの使用周波数を表す．例えば，ZigBeeの使用周波数が2.405GHz（紺色の折れ線）で，2.412GHzのワイヤレスLAN干渉信号を衝突させたときの干渉除去値は6dBmとなる．

た，RF信号も同軸ケーブルを介して測定しました．

米国National Instruments社のテスト・システム開発環境「LabVIEW」の制御ソフトウェアを用いて，トランシーバICの受信割り込みとCRCステータスを見ることで，パケット受信が成功したかどうかの確認を行いました（受信割り込みは，パケット受信が終了すると発生する）．

図7に，試験結果を示します．ZigBeeの使用周波数が2.405GHz（紺色の折れ線）で，2.412GHzのワイヤレスLAN干渉信号を衝突させたときの干渉除去値は6dBmです．ZigBeeの受信感度－82dBmに対して，ワイヤレスLAN側の受信感度を－10dBmからZigBeeのパケット受信が成功するまで落としていきました．そして，ワイヤレスLAN側の受信感度が－76dBmになったときにパケット受信が成功したので，ここで測定を終了しました．つまり，干渉除去値は－76－(－82)＝6dBmとなるわけです．

つまり，希望周波数と干渉周波数は近くに存在しますが，干渉信号の電力を下げることでパケット受信が成功したことを示しています．

各チャネルについても測定を行いました．今回の試験では，「チャネル変更で電波干渉を防げる」ことを確認することがもう一つの目的です．

例えば，**図7**のピンク色で示したグラフは，ZigBeeの使用周波数が2.430GHzの場合を表しています．このグラフを見ると，横軸のワイヤレスLAN干渉信号が2.430GHzのポイントでは，干渉除去値が4dBmとなっています．そこから22MHz離れる，すなわち2.430＋0.022＝2.452GHzのときは38dBm，2.430－0.022＝2.408GHz付近では（グラフには示していないが）34dBmです．2.430GHzを中心にして±22MHz以上離れたのときの干渉除去値は約30dBm以上になることがわかりました．

このことは，チャネル変更（お互いの周波数を離すこと）によって干渉信号の出力をそれほど下げなくても，パケット受信が成功したことを示しています．つまり，ZigBeeのトランシーバは，干渉元となるワイヤレスLANが使用しているチャネルとZigBeeそのものが使用しているチャネルを約22MHz以上離すことで約30dBm以上を除去できます．結果として99%以上のパケットを受け取れることが測定結果より得られました．

希望するチャネルと干渉チャネルの間の周波数の差が干渉チャネルの占有帯域幅より大きいならば，干渉信号の電力をそれほど下げなくてもパケット受信は成功するという結果から，「チャネル変更で電波干渉を防ぐことができる」と言えます．逆に，希望するチャネルと干渉チャネルの周波数の差が干渉チャネルの占有帯域幅より小さいならば，干渉信号の電力を下げないとパケット受信は成功しないという結果（つまり，干渉信号の電力を下げると，パケット受信は成功するという結果）から，「送信電力を下げることで電波干渉を防げる」と言えます．

あらい・やすゆき，まつお・こういち
フリースケール・セミコンダクタ・ジャパン（株）

<筆者プロフィール>

荒井康之．1992年，大学の通信工学専攻課程を修了．無線データ通信装置の開発やPHSチップなどの半導体開発の技術マーケティングに従事する．2004年，フリースケール・セミコンダクタ・ジャパンに入社し，近距離無線通信によるシームレス・コネクティビティの実現を目指す．

松尾浩一．1993年，日本モトローラに入社．1年間FAEのトレーニングを受けた後，ASIC設計を担当．その後，無線通信関連のIC設計，ICインテグレーション，IC検証などを行う．現在，シームレス・コネクティビティの実現に向けて技術分野をサポート．